

コンパクト ERL におけるビームロスの研究

BEAM LOSS STUDIES FOR THE KEK COMPACT-ERL

田中 織雅^{#,A)}, 中村 典雄^{A)}, 島田 美帆^{A)}, 原田 健太郎^{A)}, 梅森 健成^{A)}, 阪井 寛志^{A)}, 古屋 貴章^{A)}, チェン ニ エンリコ^{B)}

Olga Tanaka^{#,A)}, Norio Nakamura^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Takaaki Furuya^{A)}, Enrico Cenni^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} The Graduate University of Advanced Studies (Sokendai)

Abstract

We performed the beam loss study for the compact Energy Recovery Linac (cERL) at KEK. To this purpose the Touschek effect with intra-beam scattering, the residual gas scattering (elastic and inelastic cases) were examined using existing and modified ELEGANT routines, and developed MATLAB data analysis algorithms to handle the large amount of data that is produced by the program. In addition we performed several simulations to judge the impact of field emission issued from the main cavity. By studying the beam losses of cERL, we can better understand the loss mechanisms, estimate the beam loss rates, and localize potentially dangerous areas of the beam line, which is important for the safety low-emittance and high-current beams operation. The data obtained then are compared with the theoretical estimation to verify the accuracy of the simulations.

1. はじめに

コンパクト ERL (cERL) ^[1]は次世代 ERL 光源の実証試験機として建設され、現在コミッショニング中である。cERL 及び次世代光源の放射線遮蔽の設計を決める上で、cERL のビーム損失について詳細な研究を行うことは必要不可欠である ^[2]。我々は、安全に低エミッタンスかつ大電流ビーム運転を行うことを目指して、損失メカニズムの理解、ビーム損失率の評価、ビームライン上でビーム損失の局在化など、フィールドエミッションを含むビーム損失の問題に取り組んでいる。

Table 1: cERL Beam Parameters

Beam parameters	Simulation	cERL
Maximum energy	20 MeV	20 MeV
Total beam current	10 mA	10 – 100 mA
Repetition	1.3 GHz	1.3 GHz
Charge per bunch	7.7 pC	7.7 – 77 pC
Normalized beam emittance	1 mm·mrad	0.1 – 1.0 mm·mrad
Rms momentum spread	$1 \cdot 10^{-3}$	$< 3 \cdot 10^{-4}$
Bunch length	2 ps	1 – 3 ps

まずは、いくつかのビーム損失メカニズムを詳細に検討した。それらは、Touschek 散乱 (TS)、イントラビーム散乱 (IBS)、残留ガス散乱 (RGS) である。残留ガス散乱には 2 種類あって、1 つは弾性散

乱 (RES) であるラザフォード散乱、もう 1 つは非弾性散乱 (RIS) である制動放射が主である。さらに、我々は、実験ホールの放射線環境を低下させる可能性がある主空洞からのフィールドエミッション (FE) で生じる電子の損失を考えた。

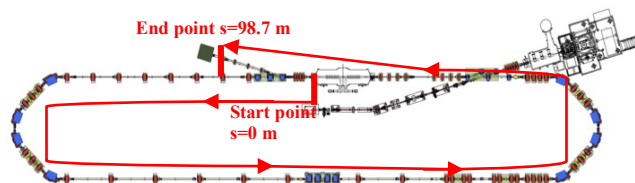


Figure 1: The beam line used of the cERL lattice “normal-20130815” for tracking simulations.

2. TOUSCHEK 散乱

ビーム内のクーロン散乱は、大角度散乱 (Touschek 散乱) および、小角度散乱 (イントラビーム散乱) の 2 種類がある。これらの散乱によって、大電流運転ではビーム損失の増大とエミッタンスの増大を考慮する必要がある。ただし、cERL におけるイントラビーム散乱によるエミッタンスの成長時間は計算の結果、周回時間に比べて小さいことがわかったので、ここでは省略する。

Touschek 散乱 (TS) ではバンチ内の電子の運動量の横方向から縦方向への移動が起こり、この縦方向運動量のずれがビーム損失につながる。TS による散乱率を記述する一般的な式は、Piwinski によって次のように求められている^[3]。

$$R \left[\frac{\text{particles}}{\text{sec}} \right] = \frac{r_p^2 c \beta_x \beta_y \sigma_h N_p^2}{8 \sqrt{\pi} \beta^2 \gamma^4 \sigma_{x\beta}^2 \sigma_{y\beta}^2 \sigma_s \sigma_p} \times F(\tau_m, B_1, B_2), \quad (1)$$

#olga@post.kek.jp

式(1)中で使用されているパラメータの定義は文献に従う。TS によるビーム散乱シミュレーションを行うため、ELEGANT^[4]という粒子トラッキングコードを使った。Touschek 散乱のルーチン^[5]は、モンテカルロ法^[6]によって電子の分布を生成し、ビームラインに予め挿入した各散乱点で粒子の分布を生成してくれる。その後、生成された電子はビームラインの終端、または損失点まで追跡される (Figure 1)。バンチ内の電子の散乱確率は、メラー散乱の散乱断面積で記述される^[7]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_p^2}{4\gamma^2} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right)^2 \left(\frac{4}{\sin^4\theta} - \frac{3}{\sin^2\theta} \right) + \frac{4}{\sin^2\theta} + 1 \right\}, \quad (2)$$

ここで、 θ は衝突前の運動量と衝突後の運動量の間の角度で、 $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ は立体角である。

散乱する粒子のトラッキングは ELEGANT 内のバグのためにビームラインの途中でクラッシュしていた。ゼロ除算という簡単なバグではあったが、cERL のように損失確率が低い場合、特定の条件でしか発生しないことが分かった。そのためにこのバグがこれまでに発見されていなかったと考えられる。このバグを修正した後に、ビーム損失分布を取得してビーム損失率を評価した。

シミュレーションの結果、 $s = 93$ m の地点で最大のビーム損失率のピーク (21 pA/m) を持つことがわかった。ここは、減速ビームをダンプへと導く偏向電磁石による分散が発生し、なおかつ横方向アパーチャが $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ と相対的に小さいためだ (その直後にダンプラインでアパーチャが 4.5 cm に広がっている)。なお、損失される電子は、アーク部の運動量アクセプタンスが小さい場所で散乱したものである。

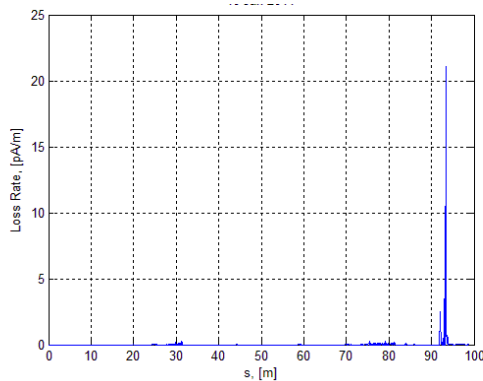


Figure 2: Beam loss due to Touschek effect (pA/m) as a function of the longitudinal position (m).

シミュレーション結果の信頼性を確認するために、我々は非常に粗い近似式を使った^[7]

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{\sqrt{\pi} r_0^2 N_b^2 C(\epsilon)}{\gamma^3 V_b \sigma_x' (\Delta p/p)^2}, \quad (3)$$

ここで $C(\epsilon) \approx -\log(1.732\epsilon) + 3/2$ 。ビーム損失率の比較を以下の Table 2 に示す。

3. 残留ガス散乱

ビームと残留ガスの原子・分子との散乱もビーム損失を引き起こす。弾性散乱と非弾性散乱は、原理的に異なる 2 つの効果である^{[8][9][10]}。弾性散乱の場合、電子が散乱で横方向に蹴られ、その電子のベータトロン振動の振幅が増大する。ベータトロン振動が加速器の横方向のアパーチャより大きくなる場合、電子は失われる。弾性散乱はラザフォード散乱断面積によって記述される。非弾性散乱の場合は、電子は残留ガスの原子核との制動放射によって光子を放出してそのエネルギーが減少する。また、電子が残留ガス原子へエネルギーを与えてガス原子を励起させる散乱もある。どちらの場合も、電子のエネルギーがビームラインの運動量アクセプタンスを超えると電子が失われる。

弾性及び非弾性散乱によるビーム損失を調べるために、我々は、ELEGANT トラッキングコードに追加のルーチンを実装した。これらのルーチンの出力は 2 つの部分から成る。1 つは積分された全断面積に基づいて総損失率を計算し、もう 1 つはモンテカルロ法による微分散乱断面積を用いてビームラインに沿ってビーム損失分布を計算する。

式(4)に示すように、単位時間あたり失われる電子の数は、散乱による損失断面積に比例することを考慮し^[11]、それに残留ガス原子の数密度 ρ_{target} 、入射電子の数 N_{beam} 、2 つの粒子の相対速度 v を掛けることで表される。

$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma N_{\text{beam}} \rho_{\text{target}} v, \quad \text{ここで} \quad \frac{dN}{dt} = \frac{c}{f} \frac{dN}{ds}. \quad (4)$$

弾性と非弾性散乱の両方に対して同じ方法を使用するが、弾性と非弾性散乱で断面積は異なる。式(4)の毎秒失われる電子数から長手方向距離 s の単位長さ当たり失われた電子の数も計算できる。ここで f は、バンチの繰り返し周波数である^[12]。ビーム損失を決定するために、我々はこの式(4)を適用した。

また、モンテカルロシミュレーションのために、微分散乱断面積による式(5)を使用した。

$$w = \frac{dN}{dt \cdot d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega} N_{\text{beam}} \rho_{\text{target}} v = \frac{c}{f} \frac{dN}{ds \cdot d\Omega}. \quad (5)$$

任意の種類残留ガス原子の数密度は、各原子の圧力を使って次のように表される。

$$\rho_{\text{target}}^i = P^i \frac{P^i N_A}{P_{\text{atm}} V_{\text{std}}}, \quad (6)$$

シミュレーションでは、残留ガスを一酸化炭素 (CO) を仮定した。ガスの圧力は cERL の場合は 10^{-6} Pa を仮定した。次世代光源の場合 10^{-8} Pa になるだろう^[13]。

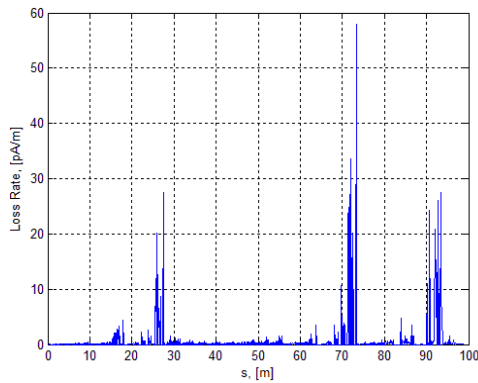


Figure 3: Loss distribution due to elastic scattering (pA/m).

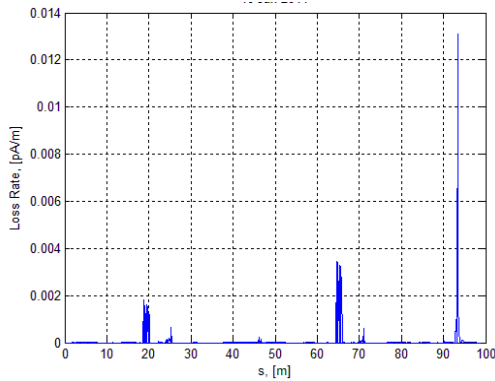


Figure 4: Loss distribution due to inelastic scattering (pA/m).

弾性散乱の場合には、周回する電子は残留ガス原子によって電子は横方向に蹴られて、そのベータトロン振動の振幅は増加する。その結果、ベータトロン関数が大きい場所で失われている。特に、cERLでは平均的にベータトロン関数が大きい垂直面が多い。非弾性散乱の場合には、エネルギー損失 (dE/E) した電子が、分散またはベータトロン関数が大きいところで横方向アパーチャ制限によって失われる。シミュレーションの結果、RESのピーク損失電流は 58 pA/m、RISのピーク損失電流は $1.3 \cdot 10^{-2}$ pA/m と計算された。RESの平均ビーム損失電流は 0.76 pA/m、RISの平均ビーム損失電流は $5.9 \cdot 10^{-5}$ pA/m であった。

我々のシミュレーション結果の妥当性を確認するために、式(7)を使ってバック・オブ・エンベロープの計算を行った。この式は、最大 $\theta_{\max} = 1$ mrad よりも大きな蹴り角となるラザフォード散乱による断面積である^[11]。

$$\sigma_{\text{loss}} = \frac{2\pi Z^2 r_p^2}{\gamma^2} \frac{1}{\theta_{\max}^2}, \quad (7)$$

4. 主空洞におけるフィールド・エミッション

フィールドエミッション (FE) は、空洞表面の高電界領域からの電子の放出で、主要な放射線源の1つになる可能性がある^{[14][15]}。実際に cERL でもビームが小電流の場合、主空洞から FE の電子損失が支配的になっている。ここでは、ビームダイナミクスの観点から、どのように FE 電子がビームラインに沿って伝搬されて損失するかを調べた。

空洞内で発生する FE 電子分布は、E. Cenni らによって複数のプログラム (Fishpact, Superfish, EGS5) を使って計算され、回転マッピングシステムを使ったクライオモジュールの大電力試験で得られた実験データとも比較された^{[16][17][18][19]}。まず、空洞の入口/出口での FE 分布をこの計算に基づいて作成した。ここではエミッション源は第1、第2セル間のアイリスでその面積と enhancing factor をそれぞれ $8 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 、100 と仮定した。出口と入口の FE 電子の分布は全く同じものとした。この分布は、電子の横方向の位置と角度及びエネルギー、さらに間隔 ± 3 ps の範囲で一様ランダムにサンプリングされた時間の分布を含んでいる。

この分布を初期分布として、ELEGANT ルーチンを使用して、周回部において順方向と逆方向に FE 電子が失われるまでトラッキングを行った。この時、正確なトラッキングを実行するために、ドリフトスペース、偏向電磁石、四極磁石などのラティス要素をシンプレクティックなものに変更した^[20]。

そのトラッキングから得られた FE 電子の損失分布を Figure 5 と Figure 6 に示す。ただし、空洞の加速勾配は $E_{\text{acc}} = 15 \text{ MV/cav}$ と仮定した。図からわかるように、FE 電子は順方向シミュレーション (Figure 5) では、放出された電子の大部分は空洞の出口から約 2.5 m で始まるダンプシケインで失われ、生き残った電子も空洞の出口から 18.7 m 離れた偏向電磁石 #1 までに完全に失われた。一方、逆方向に伝播する FE 電子は、全て空洞の入口から 7.1 m 離れている入射シケインで失われた。

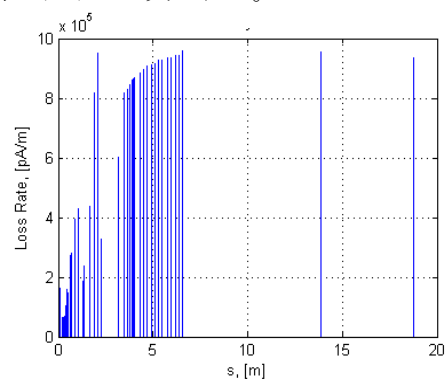


Figure 5: Loss distribution of the emitted electrons (pA/m) downstream the beam line.

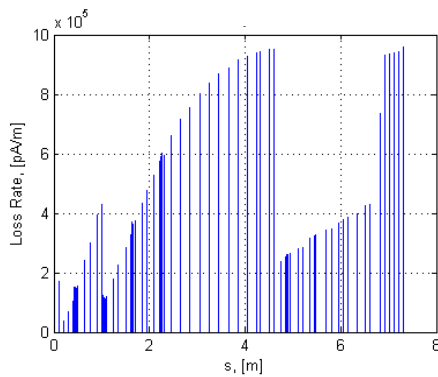


Figure 6: Loss distribution of the emitted electrons (pA/m) upstream the beam line.

5. まとめ

調べたビーム損失メカニズムによる影響は、全て以下の表に要約されている (Table 2)。ビーム電流 10mA を仮定した 3 種類の散乱によるビーム損失は 1 nA より小さく、現在の放射線遮蔽で深刻な問題にならないと期待される。FE 電子の影響については、計算で使用パラメータ値や FE 源の場所などの妥当性が明確ではないが、注意すべき必要があることが計算結果からもわかる。

Table 2: Results Summary

	Peak [pA/m]	Aver. [pA/m]	Theor. [pA/m]
TS	21	0.04	0.11
RES	58	0.76	0.44
RIS	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$5.9 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$
FE	$95.7 \cdot 10^4$	Down. $3.54 \cdot 10^4$	Up. $1.66 \cdot 10^4$

ELEGANT トラッキングコードで扱ったビーム損失の評価は、ビーム損失率だけではなく、ビーム損失分布の情報も含まれる。損失が発生している「ロスポイント」だけでなく、その源になった散乱発生場所「ソースポイント」も調べた。3 GeV 光源ではビームエネルギーとビーム電流が共に増加するので、散乱がビーム損失に与える影響はより大きく、深刻な問題になる可能性もある。従って、3 GeV 光源の設計において、新たにシミュレーションを実行して評価する必要がある。

主空洞からの FE 電子は、今回扱った損失メカニズムの中でもっとも支配的になる可能性が高い。現在の cERL 運転では加速勾配が十分に低く抑えられているので、クライオモジュール近辺での放射線は問題ないレベルにある。ただし、将来のアップグレードによるクライオモジュールの増強においては、FE 電子の初期分布や損失場所の分布も変わるため、再度評価して損失電子による放射線に対応する必要があるだろう。

参考文献

- [1] N. Nakamura et al., in these proceedings.
- [2] M. Shimada et al., in these proceedings.
- [3] A. Piwinski, The Touschek Effect in Strong Focusing Storage Rings, DESY 98-179 (1998).
- [4] M. Borland, "ELEGANT: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation", Advanced Photon Source LS-287, September (2000).
- [5] A. Xiao and M. Borland, in Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference, Albuquerque, New Mexico (IEEE, Albuquerque, New Mexico, 2007), p. 3453.
- [6] S. Khan, "Simulation of the Touschek Effect for BESSY II: A Monte Carlo Approach," Proc. of EPAC1994, 1192 (1994).
- [7] Le Duff, "Single and Multiple Touschek Effects", in Proc. of the CERN Act. School, Berlin 1989, CERN 89-01, pp. 114-130.
- [8] C. J. Bocchetta, Gas Scattering, CERN Accelerator School - "Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers", Brunnen, Switzerland, July (2003).
- [9] G. H. Hoffstaetter et al., "Intra Beam Scattering in Linear Accelerators, Especially ERLs", Proceedings EPAC08, Genova, IT (2008).
- [10] A. V. Fedotov, "Intra-Beam Scattering and its Application to ERL", Advanced Beam Dynamics Workshop, KEK, Tsukuba, Japan, October (2011).
- [11] A. Wrulich, "Single-Beam Lifetime", CERN Accelerator School - "5th General Accelerator Physics Course", Jyväskylä, Finland, Sep (1992), pp.409-435.
- [12] A. Chao and M. Tigner, "Handbook of Accelerator Physics and Engineering", p. 601.
- [13] N. Nakamura, "残留ガスによるビームロス", KEK, Beam Dynamics Working Group Meeting, August (2013).
- [14] H. Padamsee et al., *RF Superconductivity for Accelerators*, (New York / Chichester / Weinheim / Brisbane / Singapore / Toronto: John Wiley & Sons, inc., 1998), 227.
- [15] S.E. Mayes et al., "Dark Currents Simulations for the Cornell ERL", IPAC'11, San Sebastian, Spain, p.2214 (2011).
- [16] E. Cenni et al., "Field Emission Measure during cERL Main Linac Cryomodule High Power Test in KEK", SRF2013, Paris, France, p.672(2013).
- [17] E. Cenni et al., "Field emission simulation for KEK ERL 9cell superconducting cavity", IPAC'12, New Orleans, USA, May 2012, p.295 (2012).
- [18] H. Sakai et al., "High power tests of KEK-ERL input coupler for main linac under liquid nitrogen condition", SRF'2011, Chicago, July, 2011, p.356 (2011).
- [19] K. Umemori et al., "Vertical test results for ERL 9-cell cavities for compact ERL project", IPAC'12, New Orleans, USA, May 2012, p.2227 (2012).
- [20] N. Nakamura, "cERL 主空洞フィールドエミッションの電子損失シミュレーション", KEK, Beam Dynamics Working Group Meeting, March (2013).